

Impulsní LC oscilátor

© Ing. Ladislav Kopecký, 2002

Upozornění: Tento článek předpokládá znalost práce „Rezonanční obvod jako zdroj volné energie“.

Při praktických pokusech s elektrickou rezonancí jsem nejdříve použil generátor funkcí a nízkofrekvenční výkonový zesilovač. Toto řešení však mělo několik nevýhod:

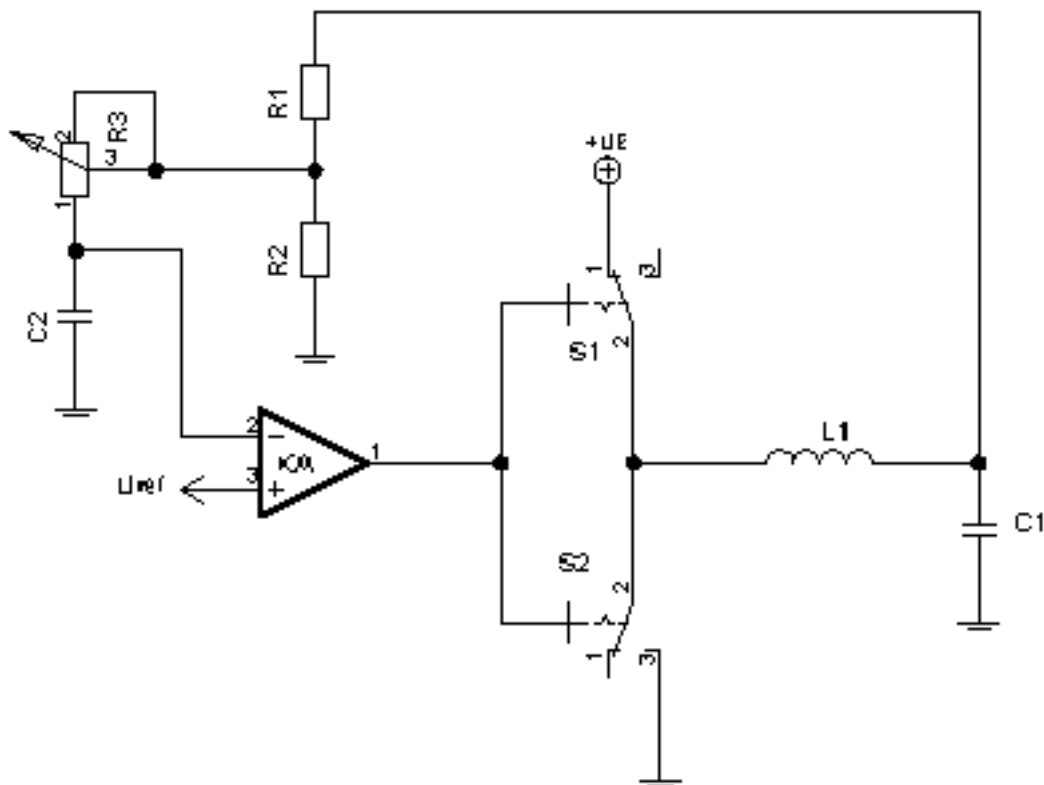
- 1) zesilovač byl značně namáhán a přehříval se,
- 2) zesilovač neměl dostatečně malý vnitřní odpor a
- 3) při použití součástek s vysokým činitelem jakosti bylo obtížné udržet LC obvod v rezonanci.

Proto jsem zvolil jiné řešení, které spočívalo v použití elektronického přepínače tvořeného komplementárními výkonovými tranzistory MOSFET, který jsem budil z generátoru funkcí. Pomocí tohoto elektronického přepínače jsem sériový LC obvod střídavě připojoval ke zdroji napětí a na zem. Tím se mi podařilo minimalizovat ztráty ve výkonových elektronických prvcích a dosáhnout malého vnitřního odporu (při použití vhodného zdroje napětí). Zůstal však problém udržet LC obvod v rezonanci. Nakonec jsem zvolil jednoduché a velmi elegantní řešení, které spočívalo v tom, že jsem vlastní sériový LC obvod použil jako generátor střídavého proudu. Jeho blokové schéma najdete na obr. 1.

Generátor se skládá ze sériového LC obvodu tvořeného indukčností L a kondenzátorem $C1$, elektronického přepínače tvořeného spínači $S1$ a $S2$, děliče napětí tvořeného odpory $R1$ a $R2$, zpoždovacího členu tvořeného odporem $R3$ a kondenzátorem $C2$ a komparátoru KA . Nyní si popíšeme, jak to funguje. Předpokládejme, že po zapnutí napájení je kondenzátor $C1$ vybit. Ten se začne nabíjet ze zdroje UB přes sepnutý spínač $S1$ a indukčnost L . Jakmile napětí na kondenzátoru $C1$ přesáhne určitou hodnotu, která je daná velikostí napětí U_{ref} , přivedeného na jeden ze vstupů komparátoru, a hodnotami rezistorů $R1$ a $R2$, komparátor rozepne spínač $S1$ a sepne spínač $S2$. Vypnutím proudu protékajícího cívkou L se v ní naindukují napětí, které nabije kondenzátor $C1$. Po předání veškeré energie cívkou L do kondenzátoru $C1$ se tento kondenzátor začne přes indukčnost L a sepnutý spínač $S2$ opět vybíjet. Po poklesu napětí na kondenzátoru $C1$ pod určitou hranici se spínač $S2$ rozepne, sepne se spínač $S1$ a děj se opakuje, dokud nedojde k odpojení napájení. Zpoždovací člen tvořený odporem $R3$ a kondenzátorem $C2$ zpožďuje přepnutí elektronického spínače tak, aby amplituda výstupního napětí byla maximální. Jeho funkci lze vysvětlit pomocí analogie s kyvadlem. Pokud chceme dosáhnout maximální amplitudy kyvu s vynaložením co nejmenší energie, musíme na toto kyvadlo působit silou v intervalu, kdy směr síly a směr pohybu kyvadla jsou shodné.

Ani toto řešení nebylo úplně ideální, protože bylo nutné odporem $R3$ nastavovat fázový posun, který byl navíc do určité míry frekvenčně závislý. Proto jsem přistoupil k vymyšlení varianty č. 2. Obvodové schéma je na obr. 2. Dvojici přepínačů tvoří komplementární dvojice polem řízených tranzistorů $T2$ a $T3$, které jsou buzeny šesticí C-MOSových invertorů 4049. Použití těchto budičů se ukázalo jako nezbytnost, protože mezi emitorem S a hradlem G tranzistoru je napěťově závislá kapacita, která dosahuje hodnoty řádově až 1 nF . Aby byla zajištěna co největší rychlost spínání, a tím co nejmenší ztráty, musí být výstupní odpor budiče co nejmenší. Velikost napětí na kondenzátoru $C1$ je upravena děličem napětí, tvořeném odpory $R5$, $R6$ a $R8$. Upravené napětí je přivedeno na vstup operačního zesilovače $IC1B$, který je zapojen jako invertující zesilovač. Kombinace zesílení a velikosti zpětnovazebního signálu je nastavena tak, aby docházelo k saturaci $IC1B$. V tom případě je na jeho výstupu napětí přibližně ve tvaru lichoběžníku. Toto napětí je přivedeno na vstup derivátoru tvořeného prvky $C2$, $IC1A$ a $R1$. Derivací signálu vzniknou na výstupu $IC1A$ pravoúhlé kladné a záporné obdélníkové impulsy, které jsou vzhledem k průběhu

napětí na kondenzátoru vhodně načasované. Záporný impuls je diodou D1 oříznut, tudíž je LC obvod buzen pouze kladnými impulsy.



Obr. 1

Zenerovy diody D2 a D3 na vstupu IC1B jej chrání před přepětím a Zenerovo napětí obou diod by mělo být o jeden až dva volty nižší než napájecí napětí.

S obvodem podle zapojení na obr. 2 byla provedena měření. Zde jsou výsledky a jejich analýza:

Naměřené hodnoty:

Napájecí napětí = 12V, amplituda proudu $I = 0.44\text{A}$,

Parametry cívky: odpor vinutí $R_L = 4,7\Omega$, indukčnost $L = 46,1\text{mH}$, jádro: ferit 20x20x80mm, hmota H21,

Kondenzátor: KERR KPI, 150nF/1000V, změřená kapacita $C = 154\text{nF}$,

Amplituda napětí na kondenzátoru: $U_{C1} = 240\text{V}$, $U_{C2} = 120\text{V}$,

Odpor zařazený do obvodu: $\Delta R = 13,8\Omega$,

Průběh napětí na hradlech tranzistorů MOSFET: šířka impulsu $T_1 = 80\mu\text{s}$, perioda $T = 530\mu\text{s}$.

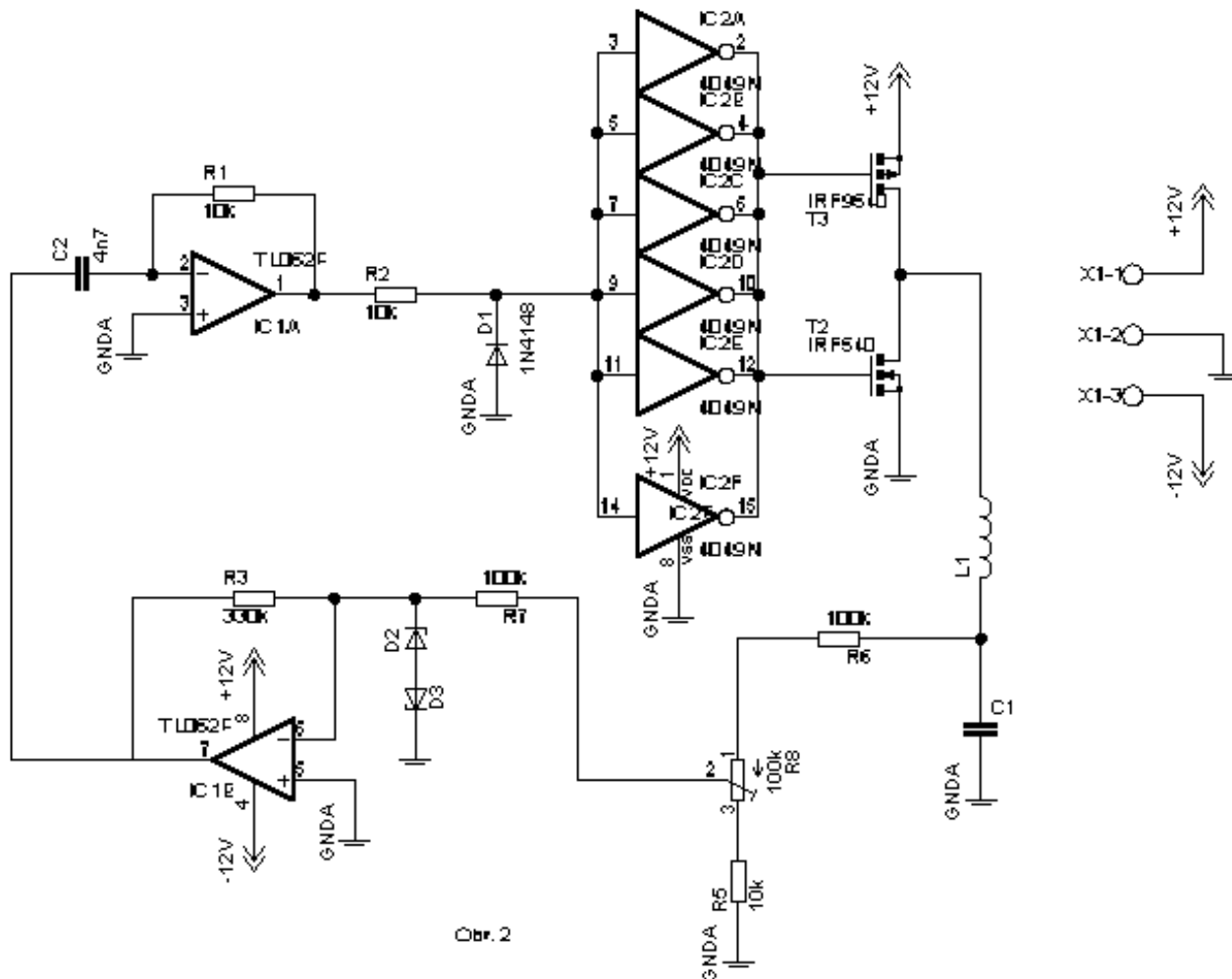
Výpočet dalších parametrů a jejich analýza:

Frekvence $f = 1/T = 1887\text{Hz}$,

Střída $T_1/T \cdot 100 = 15\%$,

$$\Delta R$$

Celkové činné ztráty v obvodu: $R = \frac{\Delta R}{U_{C1}/U_{C2} - 1} = 13,8\Omega$,



Obr. 2

$$\text{Účinnost: } \eta = \frac{\sqrt{L/C}}{2\pi R} \cdot 100 = 631\%,$$

$$\text{Napět'ový přenos: } A_u = \eta \cdot 2\pi = 39,6,$$

Zavedeme pojem „ekvivalentní zdroj harmonického napětí“. Je to takový zdroj, jehož účinky jsou stejné jako účinky zdroje impulsů. Amplituda napětí tohoto zdroje bude:

$$U_{1e} = \frac{U_{C1}}{A_u} = 6,06V,$$

Máme změřenou hodnotu amplitudy proudu procházejícího obvodem ($I = 0,44A$). Přesvědčíme se, jestli ke stejné hodnotě dojdeme také výpočtem:

$$I = \frac{U_{1e}}{R} = 0,439A, \text{ což je shoda téměř dokonalá a rozdíl jde na vrub nepřesnosti měření.}$$

$$\text{Příkon } P_1 = R \cdot I_{ef}^2 = 1,33VA, \text{ výkon cívky } P_L = P_1 \cdot \eta = 8,33W.$$

Nyní provedeme malý myšlenkový experiment. Uvažujme, jaký budeme potřebovat zdroj napětí, abychom v cívce vyvolali stejný proud, pokud do obvodu nebude zařazen kondenzátor. Jelikož obvod nebude v rezonanci, bude se uplatňovat reaktance cívky a celková impedance obvodu bude

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} = 546,5\Omega, U = I \cdot Z = 0,439 \cdot 546,5 = 239,9V.$$

$$P = U \cdot I / 2 = 52,8VA.$$

Budeme tedy potřebovat zdroj napětí s amplitudou 240V, frekvence $f = 1887\text{Hz}$, který bude do obvodu dodávat výkon 52,8VA.

Pro zajímavost si ještě spočítáme účinnost:

$$\eta = \frac{P_L}{P} \cdot 100 = \frac{8,33}{52,8} \cdot 100 = 15,78\%.$$

To znamená, že účinnost v rezonanci je 40-krát vyšší než v tomto případě!

No dobře, řekne si přemýšlivý čtenář, ale kam se ztratilo zbývajících 84,22% energie zdroje? Pánové odborníci, kde je váš zákon o zachování energie? Kdyby platil, musel by se přece výkon dodaný zdrojem přeměnit v teplo! Ale to se nestalo.

Tento banální příklad dokazuje, že dochází k výměně energie mezi cívku a vakuem. Stejně jako se v tomto případě energie záhadně „ztratí“, v rezonanci vzniká energie z „ničeho“.

Nyní se podívejme na kondenzátor. Připojme jej na zdroj napětí jako v předchozím případě (tj. amplituda napětí je 240V, frekvence je 1887Hz. Obvodem bude protékat proud daný kapacitní reaktancí kondenzátoru $X_c = 1/(2\pi fC) = 1/2\pi \cdot 1887 \cdot 154 \cdot 10^{-9} = 547,7\Omega$. (Činné ztráty v obvodu jsme zanedbali.) Obvodem bude tedy protékat střídavý proud o amplitudě $I = U/X_c = 240/547,7 = 0,438A$. V tomto případě se „záhadně ztratil“ výkon daný součinem efektivních hodnot napětí a proudu $P = 240 \cdot 0,438/2 = 53,56W$.

Nyní provedme analýzu činných ztrát v obvodu. Vyjmeme, feritové jádro z cívky a známou metodou určíme činné ztráty v obvodu. V tomto případě je $R = 12,7\Omega$, takže na ztráty ve feritovém jádře připadá $1,1\Omega$, což není mnoho.

Poznámka: Tento výsledek není přesný, ale pouze orientační, protože vyjmutím jádra se zvýšila frekvence na hodnotu 5101Hz, neboť se tím zmenšila indukčnost cívky. Tím pádem se zvýšily dielektrické ztráty v kondenzátoru, takže ztráty připadající na feritové jádro jsou ve skutečnosti vyšší.

Nyní se podíváme na ztráty v kondenzátoru. Ve střídavém obvodu posouvá ideální kondenzátor proud před napětím o úhel 90° . U skutečného kondenzátoru je fázový posun vlivem ztrátového odporu menší o úhel δ . Ten se vypočítá ze vztahu $\text{tg}\delta = R_s/X_c = R_s \cdot \omega \cdot C$, kde R_s je sériový ztrátový odpor. Ztrátový úhel kondenzátoru závisí hlavně na použitém dielektriku.

V našem případě, zanedbáme-li vnitřní odpor zdroje, na ztráty v kondenzátoru připadá odpor zhruba 8Ω . Podívejme se, jaký ztrátový činitel $\text{tg}\delta$ odpovídá tomuto odporu:

$$\text{tg}\delta = 8 \cdot 2\pi \cdot 1887 \cdot 154 \cdot 10^{-9} = 0,0146.$$

Nakonec si ještě ukážeme, že ztrátový odpor R_s je skutečně frekvenčně závislý. Do stejného obvodu zařadíme vzduchovou cívku s menší indukčností. Frekvence oscilátoru je nyní $f = 9250\text{Hz}$.

Použijeme dvoukanálový osciloskop, kde jedním kanálem měříme napětí na kondenzátoru, zatímco druhým proud obvodem (do obvodu zařadíme malý odpor, např. $0,1\Omega$, na němž měříme úbytek

napětí). Na stínítku osciloskopu jsme odečetli fázový posun mezi proudem a napětím na kondenzátoru 80° , takže úhel $\delta = 10^\circ$. Celkový činný odpor obvodu je dán vztahem

$$R = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\omega C}$$

Po dosazení do vzorce nám vyjde $R = 19,7 \Omega$. Přitom velikost odporu vinutí této cívky je $R_L = 1,2 \Omega$. Na ztrátový odpor kondenzátoru R_s nyní připadá hodnota zhruba $18,5 \Omega$.

Na závěr si shrneme zásady, které bychom měli dodržet, abychom navrhli zařízení s rezonančním obvodem s co nejvyšší účinností:

- 1) Poměr indukčnost / kapacita zvolit co největší.
- 2) Rezonanční kmitočet zvolit co nejnižší.
- 3) Jako indukčnost použít cívku s jádrem s malými ztrátami (např. ferit).
- 4) Použít kondenzátor s nízkými ztrátami v dielektriku (např. impulsní kondenzátor WIMA).
- 5) Použít napájecí zdroj s nízkým vnitřním odporem.